

А.А. Тарасенко, к-т техн. наук, докторант, УГЗ Украины

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГОРЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА ОТ ПАРАМЕТРОВ СКЛОНА

Проведен анализ существующих моделей скорости распространения огня по слою растительного горючего материала в зависимости от параметров склона. Показано, что существующие экспериментальные данные, на основе которых строятся модели, противоречивы. Это приводит к достаточно широкому диапазону их модельных интерпретаций и невозможности идентификации адекватной модели из числа анализируемых, в связи с чем предложена собственная модель

Постановка проблемы. На скорость распространения ландшафтного пожара в значительной мере влияет крутизна склона [1,2]. Поэтому для получения надежного прогноза динамики контура ландшафтного пожара необходимо располагать математической моделью влияния параметров рельефа $z(x, y)$ на скорость кромки V_r [3]. В общем случае необходимо знать зависимость вида $V(\alpha, \varphi)$, где α - угол наклона плоскости (поверхности с постоянной экспозицией β); φ - азимутальный угол.

Анализ последних исследований и публикаций. Обзору существующих математических моделей ландшафтных пожаров и компьютерных программ, построенных на их основе, посвящен ряд работ [4-11]. При этом отсутствует количественный анализ моделей влияния параметров склона на скорость распространения кромки пожара.

Постановка задачи и ее решение. Для получения модели, адекватно описывающей зависимость скорости распространения кромки пожара по поверхности рельефа от его параметров, необходимо проанализировать и обобщить уже существующие модели.

Среди моделей скорости распространения огня по поверхности рельефа можно выделить классы одномерных [2,12-17] и двумерных [14, 19] моделей. Отметим, что все упомянутые модели получены для условий постоянства пирологических факторов (таких как запас, влажность и т.д.), в отсутствие ветрового воздействия для склонов с постоянной экспозицией β и наклоном α (т.е. для плоскости), что позволяет отсечь влияние иных, нежели склон, пирологических факторов.

Модели первого типа описывают зависимость скорости распространения линейной кромки вверх $V(\alpha, 0)$ и вниз $V(\alpha, \pi)$ по склону от его крутизны (наклона) α (величина склона отсчитывается от горизонтальной поверхности). В терминах лесной пирологии, используемых для описания тактических частей кромки пожара, такую скорость будем называть фронтальной $V_{\text{гф}}$ и тыловой $V_{\text{гт}}$ (индекс $г$ используется, чтобы выделить «рельефную» компоненту и отличить от аналогичной «ветровой»).

Модели второго типа описывают зависимость азимутальной скорости $V_r(\varphi)$, где φ - угол между лучами очаг - фронт и очаг - произвольная точка контура пожара. Т.е. по сути - это модели годографа вектора скорости, аналогичные моделям [20, 21] для ветрового воздействия.

Эмпирический материал, относительно скорости распространения кромки ландшафтного пожара на рельефе, получен тремя путями. Первый - при проведении собственных (пример - [2, 15]) экспериментов, которые обеспечивают высокую точность измерения входных и выходных параметров модели и исключают влияние других факторов. Второй – проведение полевых испытаний на специально выделенных площадях с постоянной крутизной склона и однородным растительным горючим материалом (РГМ) (пример – [2, 22]). При этом нельзя исключить влияние ветра. Третий - в результате наблюдения за реальными пожарами, когда точность ниже, входные параметры подвержены пространственно-временным флуктуациям и влияние других пирологических факторов слабо поддается учету, но при этом имеет место реальный, а не лабораторный масштаб пожара. Кроме того, невозможность воспроизведения условий натуральных наблюдений в условиях реального пожара, в сравнении с многократными повторами экспериментов во втором и особенно в первом случае, делает модели, полученные на их основе, менее надежными.

По информации [2] на склонах круче 45° деревья почти не растут, и, соответственно, лесной пожар в горах невозможен. В связи с этим следует признать удовлетворительной модель в том случае, если она адекватно аппроксимирует экспериментальные данные в диапазоне $-45^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ (отрицательность угла соответствует $V_{\text{гт}}$).

Феноменология влияния параметров склона на скорость распространения кромки пожара демонстрирует увеличение фронтальной скорости с ростом наклона и дает противоречивые сведения о поведении тыловой кромки.

Согласно [2] со ссылкой на [23]: «на склонах крутизной $15 - 25^\circ$ при движении вверх по склону скорость огня может превышать в два

с лишним раза скорость его продвижения по ровному месту. Вниз по склону пожар, наоборот, движется с замедленной скоростью (в полтора-два раза медленнее, чем на ровном месте)».

Согласно [24] крутизна менее 7° не изменяет скорость кромки.

В табл. 1 приведены эмпирические данные [2], полученные из наблюдений за реальным пожаром при $-35^\circ \leq \alpha \leq 35^\circ$.

Таблица 1 - Относительное влияние крутизны склона на скорость распространения горения [2]

Крутизна склона				Коэффициент изменения скорости	Крутизна склона				Коэффициент изменения скорости
%		градусы			%		градусы		
от	до	от	до		от	до	от	до	
-70	-40	-35	-22	1,0	0	± 5	0	± 3	5,0
-39	-20	-21	-11	1,5	5	19	3	10	7,5
-19	-5	-10	-3	2,5	20	39	11	21	10,0
					40	70	22	35	25,0

Коэффициент изменения скорости показывает во сколько раз меняется скорость $V_r(\alpha)$ в сравнении с $V_r(-35^\circ)$. Такая нормировка не представляется удобной и в [2] предложена другая

$$k_r(\alpha) = \frac{V_r(\alpha)}{V_r(0)}, \quad (1)$$

которой и будем в дальнейшем придерживаться. Данная величина инвариантна относительно изменений значений других пирологических параметров и потому удобна для учета изолированного влияния величины склона.

Пересчитав данные таблицы 1, согласно (1), получим $k_r(-35^\circ \div -22^\circ) = 0,2$; $k_r(-21^\circ \div -11^\circ) = 0,3$; $k_r(-10^\circ \div -3^\circ) = 0,5$; $k_r(-3^\circ \div 3^\circ) = 1$; $k_r(3^\circ \div 10^\circ) = 1,5$; $k_r(11^\circ \div 21^\circ) = 2$; $k_r(22^\circ \div 35^\circ) = 5$;

Проанализируем одномерные модели [2, 12-17].

1. Автором [2] были проведены серии собственных экспериментов на полигонной установке, обработка результатов которых приведена в таблице 2.

Таблица 2 - Коэффициент относительного влияния крутизны склона

$\alpha, ^\circ$	-40	-30	-20	-10	0	10	15	20	25	30	35	40
$k_r(\alpha)$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2	1,5	2,0	2,9	4,9	9,5	28,0

Проведенная автором [2] аппроксимация этих данных, позволила ему получить эмпирическую зависимость

$$k_r(\alpha) = \begin{cases} 1, & \alpha \leq 0; \\ \frac{1}{\cos^2\left(2,5 - \frac{\alpha}{77^\circ}\right)}, & \alpha > 0, \end{cases} \quad (2)$$

где α - угол склона в градусах, $-40^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$.

Проведенная нами проверка данного выражения показала полную несостоятельность предложенной аппроксимации и несоответствие между (2) и данными, приведенными в табл. 2. В частности, имеет место нефизичность $\lim_{\alpha \rightarrow +0} k_r = \infty$.

2. В работе [12] приведена модель

$$k_r(\alpha) = \begin{cases} \frac{1}{1 - 0,012\alpha}, & 0 \leq \alpha \leq 8^\circ; \\ \frac{0,8}{1 - 0,032\alpha}, & \alpha > 8^\circ. \end{cases} \quad (3)$$

Верхняя граница применимости модели не указана.

При $0^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ зависимость (3) хорошо согласуется с данными, приведенными в таблицах 1 и 2, но с ростом угла растет более круто (рис. 1). Анализ модели (3) демонстрирует наличие небольшого скачка при $\alpha = 8^\circ$. Кроме того, при $\alpha > 31^\circ$ модель становится неприменима по той же причине, что и (2). В силу этого модель нельзя признать удовлетворительной.

3. Тот же автор в работе [13] приводит модель

$$\frac{1}{k_r} = \begin{cases} \approx 1/0.7, & \alpha \leq -18^\circ; \\ 1 - \sin \alpha, & -18^\circ \leq \alpha \leq 8^\circ; \\ 0.86[1 - \sin(A[\alpha - 8^\circ])], & \alpha > 8^\circ, \end{cases} \quad (4)$$

где $A \approx 2$.

Данная модель лишена упомянутых недостатков предыдущей, но не обеспечивает гладкой сшивки на концах интервалов.

Границы применимости модели (4) не указаны.

4. В работе [14] приведена модель, полученная на основании лишь качественных теоретических рассуждений

$$k_r(\alpha) = (1 \pm \sin \alpha)^2, \quad (5)$$

в которой знак «+» соответствует движению фронта, а «-» - тыла.

Анализ (4) демонстрирует как количественное, так и качественное несоответствие этого выражения экспериментальным данным. В частности, - в диапазоне $0 < \alpha < 40^\circ$ наблюдается практически линейный очень пологий рост $k_r(\alpha)$, а для того же угла для тыльной кромки наблюдается почти десятикратный нелинейный спад.

Отметим, что позже в [14] данная модель использована при построении модели единичного контура выгорания, т.е. азимутальной зависимости скорости, анализ которой будет проведен ниже.

5. В работе [15] приведена полиномиальная модель, полученная на основе аппроксимации результатов собственных экспериментов, проведенных по схеме и на установке, аналогичной тем, что описаны в [2, 22].

Зависимость при $0^\circ < \alpha < 40^\circ$ имеет вид

$$k_r(\alpha) = 1 + 6 \cdot 10^{-3} \alpha - 1,4 \cdot 10^{-2} \alpha^2 + 2 \cdot 10^{-3} \alpha^3 - 7 \cdot 10^{-5} \alpha^4 + 10^{-6} \alpha^5. \quad (6)$$

При $-40^\circ < \alpha \leq 0$ $k_r(\alpha) = 1$.

Поскольку сами данные эксперимента не приводятся, то непонятно причина наличия неглубокого локального минимума в окрестности $\alpha \approx 6^\circ$, - связана ли она с выбором аппроксимирующего полинома или действительно имеет место. К несущественному недостатку модели следует отнести ее кусочность.

6. Модель [16] имеет вид

$$k_r(\alpha) = 1 + K \cdot \operatorname{tg}^2\left(\frac{\alpha \pi}{180^\circ}\right), \quad (7)$$

где коэффициент K пропорционален т.н. коэффициенту заполнения слоя [16]. Эта же модель находит подтверждение в результате экспериментов в лабораторных и полевых условиях [22]. Область применения модели не указана. Анализ (7) показывает, что нижний предел $\alpha = 0^\circ$, поэтому неизвестно поведение $k_r(\alpha)$ при $\alpha < 0$.

7. В работе [17] на теоретически получена модель

$$k_r(\alpha) = \frac{1}{\left(1 - \sin\left(\frac{\alpha\pi}{180^\circ}\right)\right)^2}, \quad (8)$$

которая при приближении к границам диапазона ее применимости $-35^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$ дает существенно заниженный, по сравнению с рассмотренными ранее моделями, результат.

В тоже время данная модель обладает техническими преимуществами – периодичностью и заданием зависимости единым (не кусочным) выражением.

На рис. 1. приведены графики зависимостей (3), (4), (6)-(9) и данных таблиц 1 и 2.

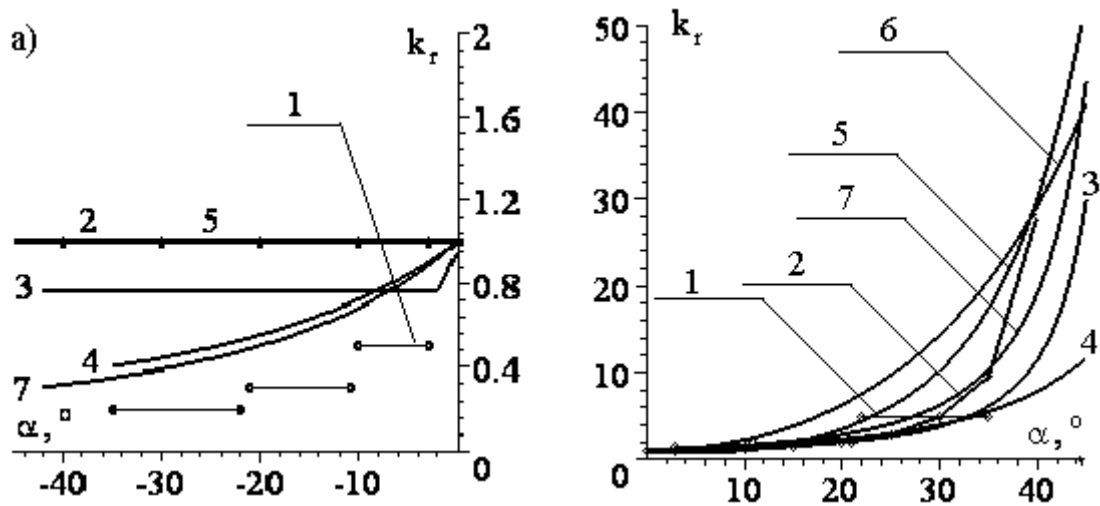


Рисунок 1 - Графики зависимости $k_r(\alpha)$: а) в диапазоне $\alpha < 0^\circ$; б) в диапазоне $\alpha > 0^\circ$. Линии: 1 – по данным табл. 1; 2 – по данным табл. 2; 3 – модель (4); 4 – модель (8); 5 – модель (6); 6 – модель (7); 7 – модель (9)

Отметим, что рассмотренные модели и экспериментальные данные достаточно противоречивы. Если для положительных углов различия носят чаще всего количественный характер, то для движения кромки вниз по склону имеются качественные несоответствия, поскольку по одним сведениям движение вниз по более крутому склону приводит к замедлению кромки, по другим – скорость остается постоянной. В связи с этим относительная погрешность взаимного рассогласования моделей (4), (6) и (7) вблизи границ диапазона превышает 500% (остальные модели не рассматриваются в силу их неадекватности).

Невозможность идентификации адекватной модели из числа анализируемых, приводит [18] к необходимости получения зависимости, основанной на аналитическом обобщении усредненных данных, лежащих в основе рассмотренных моделей. Проведя

аппроксимацию методом наименьших квадратов данных экспериментов и данных, полученных на основе рассмотренных зависимостей, в качестве окончательной модели нами предлагается уточненная модель (8) в виде

$$k_r(\alpha) = \left(1 - 1.2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha\pi}{180^\circ}\right) \right)^{-2}. \quad (9)$$

Относительная погрешность рассогласования модели (9) по отношению к (4), (6) и (7) в диапазоне $0^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ не превышает 130%. Для отрицательных значений углов отличие не играет существенной роли в силу чрезвычайно малой абсолютной погрешности.

Рассмотрим теперь двумерные модели [14, 19].

Отметим, что в случае ветрового воздействия существует достаточно большое количество моделей азимутальной скорости, обзор которых дан в [20, 21]. Этого нельзя сказать о моделях изменения азимутальной скорости под воздействием параметров рельефа. Среди таких моделей отметим лишь [14, 19]. Кроме того, в [20] говорится о возможности построения модели т.н. индикатрисы нормальной скорости для склона (суть годограф), но сама модель не приводится. В системе FARSITE [25] использована модель динамики контура пожара на основе элементарного контура в виде эллипса, зависимость параметров которого от величины склона также не приведена.

1. В работе [14] введена модель т.н. единичного контура выгорания (ЕКВ). Данная модель различается для случаев $\alpha \leq 25^\circ$ и $\alpha > 25^\circ$. Такая дифференциация объясняется ссылками на различия приведенных в [26] значений относительного расширения периметра пожара – размерной (!) величины.

Для углов $\alpha \leq 25^\circ$ предложен единичный контур выгорания в виде компиляции двух полуэллипсов

$$\frac{(V_{\parallel})^2}{(V_{rf})^2} + \frac{(V_{\perp})^2}{(V_{rfl})^2} = 1 \text{ для } V_{\parallel} \geq 0; \quad (10)$$

и

$$\frac{(V_{\parallel})^2}{(V_{rb})^2} + \frac{(V_{\perp})^2}{(V_{rfl})^2} = 1 \text{ для } V_{\parallel} < 0. \quad (11)$$

Для углов $\alpha > 25^\circ$ предложена компиляция полуэллипса

$$\frac{(V_{\parallel})^2}{(V_{rf})^2} + \frac{(V_{\perp})^2}{(V_{rfl})^2} = 1 \text{ для } V_{\parallel} \leq 0; \quad (12)$$

и полуокружности

$$\frac{(V_{\parallel})^2}{(V_{rfl})^2} + \frac{(V_{\perp})^2}{(V_{rfl})^2} = 1 \text{ для } V_{\parallel} > 0, \quad (13)$$

где V_{rfl} - скорость фланга; V_{\parallel} - координатная ось, сонаправленная с направлением движения фронта, а V_{\perp} - перпендикулярная ей.

Отметим ошибочность данной записи в [14], поскольку согласно приведенным здесь же пояснениям, (20) справедливо при $V_{\parallel} > 0$, а (13) при $V_{\parallel} \leq 0$.

При этом параметры (10)-(13) имеют связь с величиной склона в виде [14]

$$V_{rf} = V_0(1 + \sin \alpha)^2; \quad V_{rb} = V_0(1 - \sin \alpha)^2; \quad V_{rfl} = V_0, \quad (14)$$

где $V_0 = V_r(0)$.

Для анализа выражений (10)-(14) перейдем в полярные координаты.

В этом случае уравнение эллипса – ЕКВ с центром, совмещенным с полюсом, будет иметь вид

$$\rho = \frac{ab}{\sqrt{b^2 \cos^2 \varphi + a^2 \sin^2 \varphi}}, \quad (15)$$

где a и b - полуоси эллипса, определяемые выражениями (14) согласно (10)-(13), а φ - полярный угол.

Поскольку длина полуосей есть функция величины уклона α , то это позволяет нам построить в цилиндрических координатах обезразмеренный (нормированный на V_0) ЕКВ, объединивший случаи $\alpha \leq 25^\circ$ и $\alpha > 25^\circ$ (рис. 2) и являющийся, согласно (1), коэффициентом $k_r(\alpha, \varphi)$.

Анализ рисунка указывает на несостоятельность подхода в разделении единичного контура выгорания на случаи большого и малого уклона - отсутствует сшивка для тыльной части контура при $\alpha = 25^\circ$, что означает наличие нефизичного скачка в скорости распространения тыльной части контура пожара при изменении величины склона.

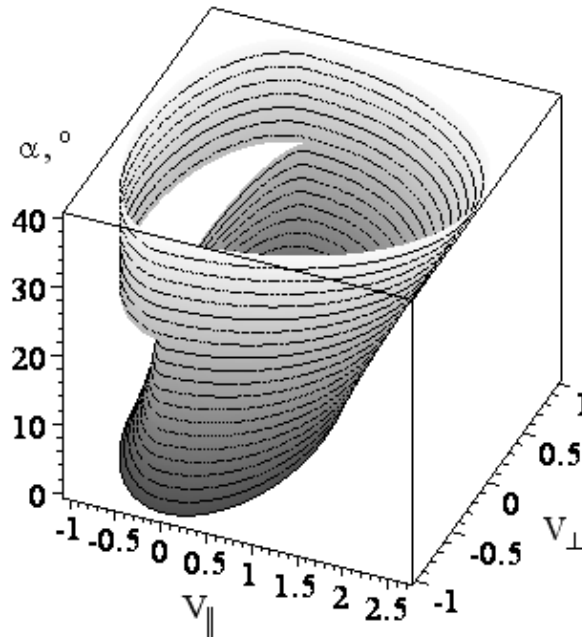


Рисунок 2 - График в цилиндрических координатах зависимости параметров безразмерного единичного контура выгорания от угла склона α и азимутального угла φ согласно [14]

2. Геометрический подход использован при выводе модели распространения кромки пожара от точечного очага по поверхности рельефа [19], которую можно интерпретировать как годограф скорости $V_r(\gamma)$, заданный параметрически в произвольной точке $(x_0; y_0)$ поверхности рельефа $z(x, y)$

$$\begin{aligned}
 V_{rx} &= V_r(\alpha(\gamma)) \left(\frac{z'_y \cos \gamma}{\sqrt{(z'_x)^2 + (z'_y)^2}} + \frac{z'_x \sin \gamma}{\sqrt{1 + (z'_x)^2 + (z'_y)^2}} \right); \\
 V_{ry} &= V_r(\alpha(\gamma)) \left(\frac{z'_y \sin \gamma}{\sqrt{(z'_x)^2 + (z'_y)^2}} - \frac{z'_x \cos \gamma}{\sqrt{1 + (z'_x)^2 + (z'_y)^2}} \right),
 \end{aligned} \tag{16}$$

где

$$\alpha(\gamma) = \arcsin \left(\frac{\left((z'_x)^2 + (z'_y)^2 \right) \sin \gamma}{\sqrt{\left((z'_x)^2 + (z'_y)^2 \right) + \left((z'_x)^2 + (z'_y)^2 \right)^2}} \right), 0 \leq \gamma < 2\pi; \quad (17)$$

$$z'_x = \left. \frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right|_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}}; \quad z'_y = \left. \frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right|_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}}. \quad (18)$$

При этом имеет место связь с азимутальным углом $\gamma = \varphi + \pi$.

Но поскольку при этом не приведена зависимость $V_r(\alpha(\gamma))$, то данная модель не имеет законченный вид. Дополнив модель [19] выражением (9) и изобразив результат моделирования (16)-(18), нами получено направление наиболее быстрого распространения кромки пожара не сонаправленное с направлением максимальной крутизны склона, что нефизично (рис. 3) и говорит об ошибочности данной модели.

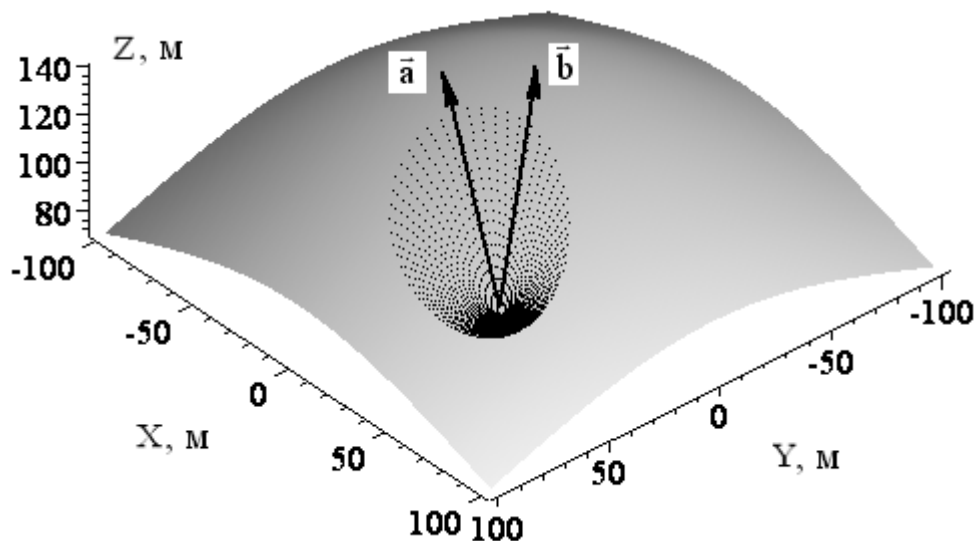


Рисунок 3 - Несовпадение направления \vec{a} максимальной скорости и направления \vec{b} максимальной крутизны склона в модели [19]

Выводы. Проведенный обзор математических моделей зависимости скорости распространения контура ландшафтного пожара от параметров склона продемонстрировал отсутствие модели $V_r(\alpha, \varphi)$, адекватно описывающих имеющиеся эмпирические данные. В этой связи актуально создание такой модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Курбатский Н.П. Техника и тактика тушения лесных пожаров. М.: Гослесбумиздат, 1962.- 154 с.
2. Софронов М.А.. Лесные пожары в горах Южной Сибири. Москва: Наука, 1967. - 150 с.
3. Абрамов Ю.А., Тарасенко А.А. Моделирование пространственной динамики природной чрезвычайной ситуации // Проблемы надзвичайних ситуацій. Зб. наук. пр. УЦЗ України. Вип. 5. – Харків: УЦЗУ, 2007.- С. 241-245.
4. Дорпер Г.А., Курбатский Н.П. Математические модели лесных пожаров: Основные понятия, классификация, требования. Прогнозирование лесных пожаров. Красноярск: ИЛид СО АН СССР, 1978. - С. 5-25.
5. Sullivan A.L. A review of wildland fire spread modeling, 1990-present. 2:Empirical and quasi-empirical models. arXiv:0706.4128v1 [physics.geo-ph]. 28 Jun 2007. - 32 p.
6. Sullivan A.L. A review of wildland fire spread modeling, 1990-present. 3:Mathematical analogues and simulation models. arXiv:0706.4130v1 [physics.geo-ph]. 28 Jun 2007. - 29 p.
7. Keane R., Burgan R., Wagtenonk J. Mapping wildland fuels for fire management across multiple scales: Integrating remote sensing, GIS, and biophysical modeling / International Journal of Wildland Fire, 2001, 10. - pp. 301-319.
8. Reinhardt E., Keane R., Brown J. Modeling fire effects / International Journal of Wildland Fire, 2001, 10. - pp. 373-380.
9. Yang J. Spatially Explicit and Stochastic Forest Landscape Model of Fire Disturbance and Succession. PhD dissertation. University of Missouri – Columbia, 2005. - 140 p.
10. McHugh Ch. Considerations in the Use of Models Available for Fuel Treatment Analysis. USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-41, 2006. - pp. 81-105.
11. Johnston P., Milne G., Klemith D. Overview of bushfire spread simulation systems / Bushfire CRC: The University of Western Australia, 2005. - 41 p.
12. Конев Э.В. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука, 1977. - 240 с.
13. Конев Э.В. Анализ процесса распространения лесных пожаров и палов // Теплофизика лесных пожаров. - Новосибирск: ИТ СО АН СССР, 1984. - С. 99 - 125.
14. Покровский Р.Л. Раннее обнаружение очагов ландшафтных пожаров и прогноз динамики их

- распространения: Дис... канд. техн. наук: 21.06.02. – Харьков, 2002. – 221 с.
15. Дыгало А.Н. Экспериментальная модель для скорости распространения фронта низового лесного пожара // Проблемы пожарной безопасности. Сб. науч. тр. – Харьков: АПБУ, 2002. – Вып. 12. – С. 91 – 93.
 16. Rothermel R.C. A mathematical model for fire spread predictions in wildland fuels. USDA Forest Service Res. Paper INT-115. Ogden, 1972.
 17. Телицын Г.П. О распространении горения в лесу // Горение и пожары в лесу. Красноярск: НИИ леса и древесины, 1973. - С. 164-176.
 18. Абрамов Ю.А., Рева Г.В., Росоха В.Е., Чучковский В.Н. Идентификация моделей скорости распространения фронта лесного пожара и их практические приложения. – Харьков: АГЗ Украины, 2004. – 114 с.
 19. Кузык А.Д., Карабин О.О. Моделювання процесу поширення лісової пожежі в умовах гірської місцевості. Пожежна безпека. Зб. наук. пр. Вип. 6, Львів: СПОЛОМ, 2005. - С. 49-53.
 20. Дорпер Г.А. Математические модели динамики лесных пожаров. – М.: Лесная промышленность, 1979. – 161 с.
 21. Басманов А.Е., Созник А.П., Тарасенко А.А. Экспериментально-аналитическая модель скорости распространения низового лесного пожара // Проблемы пожарной безопасности. - Выпуск 11. - Харьков: Фолио, 2002. - С. 17-25.
 22. Bianchini G. and other. “Wildland Fire Risk Maps using S^2F^2M ”. JCS&T. Vol. 5, № 4. 2005. - pp.244-249.
 23. Мелехов И.С. Природа леса и лесные пожары. Архангельск: АЛТИ, 1947.
 24. Амосов Г.А. Некоторые закономерности развития лесных низовых пожаров // Возникновение лесных пожаров. М.: Наука, 1964.
 25. Finney M. “FARSITE: Fire Area Simulator-Model Development and Evaluation”. Res. Pap. RMRS-RP-4. Ogden. UT: U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Rocky Mountain Research Station, 1998. - 47 p.
 26. Воробьев О.Ю., Валендик Э.Н. Вероятное множественное моделирование распространения лесных пожаров. Новосибирск: Наука, СО АН СССР, 1978. – 160 с.